Halbleitertechnik 1 Zusammenfassung

Florian Leuze

„A basic truth, that the history of the creation of the transistor reveals, is that the foundations of transistor electronics were created
by making errors and following hunches that failed to give, what was expected.“
(William Shockley)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis **4**

1 Bandstruktur/Schrödingergleichung **5**
1.1 Effektive Masse - Rückblick auf Mikro 1+2 . . . 5
1.2 Halbleitertypen . . . 5
1.2.1 Halbleiter und Metalle . . . 5
1.2.2 Elementhalbleiter . . . 5
1.2.3 Verbindungshalbleiter . . . 5
1.2.4 Legierungshalbleiter . . . 5
1.3 Bindungsarten . . . 6
1.3.1 Elektronenpaarbindung . . . 6
1.3.2 Metallische Bindung . . . 6
1.3.3 Ionische Bindung . . . 6
1.4 Bandstruktur . . . 7
1.5 Licht . . . 9
1.5.1 Röntgenstrahlung . . . 9
1.5.2 Welle-Teilchen Dualismus . . . 11

2 Anhänge **16**
2.1 Geschichtliche Facts . . . 16
2.2 Abkürzungen/Bezeichnungen . . . 16
2.3 Nice to know . . . 17
2.4 Literaturempfehlungen . . . 18
2.5 Periodensystem . . . 19
2.6 Nachwort . . . 19

3 Literaturverzeichnis **20**

Versionierung

Datum	Vers.	Kürzel	Änderung
15.10.2019	0.11	FL	Erzeugung Dokument; Erzeugung Inhaltsverzeichnis; Erzeugung Versionierung;
17.10.2019	0.12	FL	Effektive Masse; Bandstruktur; Halbleitertypen; Bindungsarten;
25.10.2019	0.13	FL	Bandstruktur;
27.10.2019	0.14	FL	Welle-Teilchen Dualismus;

Abbildungsverzeichnis

1.1 Darstellungsformen (Schulze 2019) 7
1.2 Bandstruktur Metall (Schulze 2019) 7
1.3 Metallgitter stripped 8
1.4 Metallgitter Bohrsche Radien und Fermi-See 8
1.5 Besetzbare Zustände in 2D im Metall und Halbleiter (Schulze 2019) 9

Kapitel 1

Bandstruktur/Schrödingergleichung

1.1 Effektive Masse - Rückblick auf Mikro 1+2

Die Beschreibung der Eigenleitung wird unter der Annahme getroffen, dass ein Elektron sich frei im Kristallgitter bewegen könne. Tatsächlich wirken aber innere Kräfte des Kristallgitters auf das Elektron. Diese Wirkung wird durch die Einführung einer effektiven Masse kompensiert.

$$m^* = \underbrace{\alpha}_{const.} \cdot \underbrace{m_0}_{Elektr.Masse} \quad , \ \alpha < 1, \ \text{materialabhängig} \tag{1.1.1}$$

1.2 Halbleitertypen

1.2.1 Halbleiter und Metalle

- Metalle sind grundsätzlich Kaltleiter $\rightarrow T = 0K \ \Rightarrow \ \sigma_M \rightarrow \infty$
  - T $\uparrow \Rightarrow \sigma_M \downarrow, \ \sigma_M >> 0$
- Halbleiter sind grundsätzlich Heissleiter
  - $T \uparrow \Rightarrow \sigma_{HL} \uparrow, \ \text{aber } \sigma_{HL} << \sigma_M$

1.2.2 Elementhalbleiter

Elementhalbleiter sind Halbleiter die nur aus einem Element bestehen.

1.2.3 Verbindungshalbleiter

Verbindungshalbleiter sind immer 50/50 aufgeteilt, d.h. am Beispiel eines GaN (Galliumnitrid) III-V Verbindungshalbleiter ist das Kristallgitter so aufgebaut dass au jedes Galliumatom ein Stickstoffatom und dann wieder ein Galliumatom folgt.

1.2.4 Legierungshalbleiter

Legierungshalbleiter sind im Gegensatz zu Verbindungshalbleiter beliebig mischbar. Grundsätzlich sind alle Verhältnisse denkbar die sich ineinander lösen lassen.So können auch Kristallgitter entstehen, in denen gleiche Atome direkt benachbart sind.

1.3 Bindungsarten

1.3.1 Elektronenpaarbindung

Die zentrale Bindung bei Halbleitern ist die kovalente Bindung (auch Elektronenpaarbindung genannt). Aus 1.2.4 und 1.2.2 erkennt man damit, dass bei Verbindungshalbleitern nur kovalente Bindungen zwischen unterschiedlichen Atomen vorkommen kann, also am Beispiel von vorher nur kovalente Bindungen zwischen Gallium udn Stickstoff. Bei Legierungshalbleitern können dagegen auch kovalente Bindungen zwischen selben Atomen vorkommen, zum Beispiel Si-Si (Silizium) oder Ca-Ca (Cadmium) kovalente Bindungen. Kovalente Bindungen basieren auf dem Spin der äusseren Elektronen. Da bei der kovalenten Bindung beide Elektronen von jeweils beiden Atomen als äussere Elektronen beansprucht werden müssen die Spins entgegengesetzt sein. Damit ist das magnetische Moment entgegengesetzt wodurch eine magnetische Bindung entsteht. Es lässt sich so auch das heissleitende Verhalten von Halbleitern begründen. Bei $T = 0K$ herrscht absolut keine Bewegung im Kristall. Entsprechend trennen sich die kovalenten Bindungen ohne weitere Krafteinwirkung nicht auf und damit verhält sich das Material wie ein Isolator. Steigt die Temperatur an beginnen die Ionen und Elektronen sich zu bewegen. So kann es passieren dass sich einzelne kovalente Bindungen aufbrechen.

1.3.2 Metallische Bindung

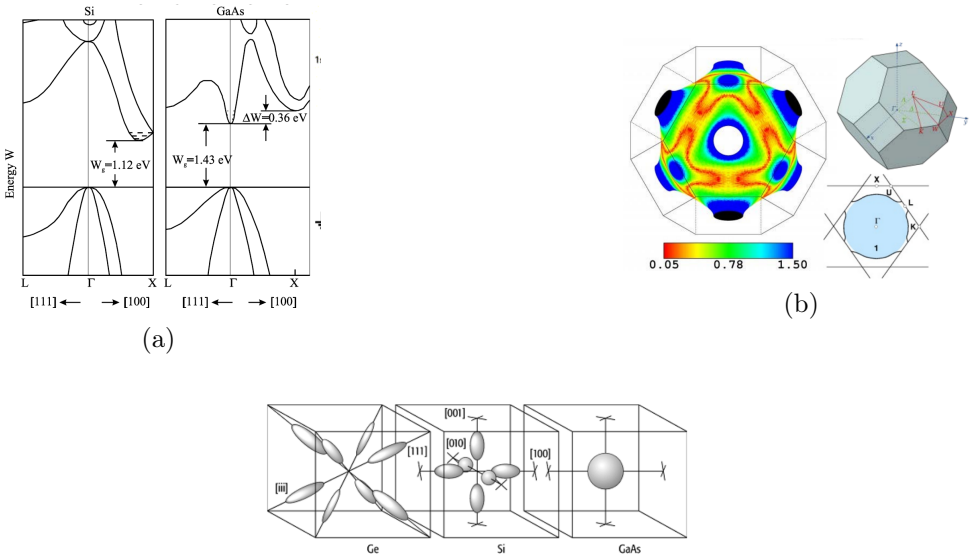
Bei einem Metall gehört jedes Valenzelektron zu sehr vielen Atomen, somit verteilt sich die Bindung über das gesamte Volumen. Man kann sich ein Metall strukturell als Raumgitter aus vielen positiven Ionen vorstellen, zwischen denen sich ein frei bewegliches Elektronengas befindet. Diese freien Elektronen bilden somit eine negative Ladungswolke. Die Wechselwirkung aus der negativen Ladungswolke und den positiven Gitterionen sind Grundlage für die metallische Bindung. Typischerweise gibt jedes Atom ein bis zwei Atome in das Elektronengas, auch Fermi-Gas oder Fermi-See genannt, ab. Damit kann man direkt abschätzen, dass die Anzahl freier Elektronen zwar von Metall zu Metall variiert, aber in der Größenordnung immer ähnlich zur Anzahl der Atome sein muss.

1.3.3 Ionische Bindung

Grundsätzlich sind Atome bestrebt Edelgaskonfiguration anzunehmen, d.h. ihre äußerste Schale mit 8 Aussenelektronen zu besetzen. Eine ionische Bindung kommt dann besonders leicht zustande, wenn ein Atom zum Beispiel Natrium ein Aussenelektron in der äußersten Schale hat in räumliche Nähe zu einem weiteren Atom kommt dem gerade ein Aussenelektron zur Edelgaskonfiguration fehlt, z.B. Chlor. Gibt das Natrium sein Aussenelektron ab so ist die "neue"äußerste Schale gerade voll besetzt. Nimmt Chlor das abgegebene Elektron auf, so ist seine äußerste Schale auch gerade voll besetzt. Das Natriumatom wird damit zu einem positiv geladenen Natriumion, das Cloratom zu einem negativ geladenen Chloridion, die beide in Edelgaskonfiguration sind. Diese Verbindung heißt Natriumchlorid. Eine ionische Bindung kann aber auch in der Form vorliegen dass ein Atom mehrere Elektronen in der äußersten Schale hat. Aluminium hat zum Beispiel 3 Elektronen in der äußersten Schale, die es abgeben müsste um Edelgaskonfiguration zu erreichen. Es wäre dann ein 3-fach positiv geladenes Aluminiumion. Um diese Konfiguration zu erreichen muss es sich mit 3 Chloratomen verbinden, da jedes Chloratom bestrebt ist nur ein Elektron aufzunehmen. Die so entstandene Verbindung heißt Aluminiumchlorid.

1.4 Bandstruktur

Es existieren 2 Arten von Bandstruktur, zum einen die bekannte elektrische Bandstruktur, zum anderen die photonische Bandstruktur, über die z.B. ein Halbleiter unter Lichteinfluss beschrieben werden kann. Grundsätzlich muss aber beachtet werden, dass die Bandstruktur ein menschengemachtes Werkzeug ist um die Vorgänge im Material zu visualisieren und begreifen zu können. Folgend einige Graphiken unterschiedlicher Darstellungsmöglichkeiten der Vorgänge im Halbleiter:



(a) (b) (c)

Abbildung 1.1: Darstellungsformen (Schulze 2019)

(a) ist eine geschickte 2-dimensionale Darstellung von (c). Die in eckigen Klammern angegebenen Zahlenkombinationen nennt man Miller Indizies. (b) zeigt die Fermi-Fläche von Kupfer. Die Bandstruktur eines Materials ist ein Modell der erlaubten Impulse und der erlautebn Orte, sowie der jeweiligen Gesamtenergie. Damit ergeben sich 7 Dimensionen die entsprechend nicht darstellbar sind. Man teilt die Struktur daher in zwei Räume ein. Den Ortsraum und den Impulsraum. In beiden Räumen stehen so 3 Dimensionen zur Verfügung. Die Gesamtenergie wird dann oft zusätzlich farblich dargestellt wie auch in 1.1 (b) zu sehen ist. Dies gibt erste Indizien über den Zusammenhang zwischen Teilchen und Welle. Der Impuls ist klassisch gegeben mit

$$\vec{p} = m\vec{v} \tag{1.4.1}$$

und lässt sich als Betrag auch schreiben als

$$|\vec{p}| = \frac{h}{\lambda} \tag{1.4.2}$$

mit h als Planksche Konstante und λ als Wellenlänge. Vektoriell lässt sich der Zusammenhang mit dem Wellenvektor $\vec{K}$ wie folgt ausdrücken:

$$\vec{K} = \begin{pmatrix} K_x \\ K_y \\ K_z \end{pmatrix} \tag{1.4.3}$$

$$\vec{p} = \hbar\vec{k} \tag{1.4.4}$$

$$|\vec{K}| := \frac{2\pi}{\lambda} \tag{1.4.5}$$

Bei der Behandlung von Wellen ist immer zu beachten, dass die entscheidenden Größen zur Beschreibung einer Welle die Frequenz f, die Wellenlänge λ und die Intensität I.

Zur Vereinfachung betrachtet man zunächst kubisch primitive Kristalle. Unter einer primitiven Elementarzelle versteht man eine Zelle, in der nur an den Ecken jeweils Atome sind. Dies ist zum Beispiel bei einem Metall durch die Metallionen gegeben.

(a) (b)

Abbildung 1.2: Bandstruktur Metall (Schulze 2019)

Als erster Ansatz kann man versuchen die Gesamtenergie im System klassisch zu berechnen:

$$\begin{aligned} E_{ges} &= E_{kin,ges} + E_{pot,ges} \\ &= \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{2} m |\dot{\vec{r_i}}|^2 + \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{2} m |\dot{\vec{R}_i}|^2 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^{N} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \cdot \frac{(-q)^2}{|\vec{r_i} - \vec{r_j}|} + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^{N} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \cdot \frac{(-q)^2}{|\vec{R}_i - \vec{R}_j|} \\ &\quad + \sum_{i,j=1}^{N} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \cdot \frac{(-q)^2}{|\vec{r_i} - \vec{R}_j|} \end{aligned} \tag{1.4.6}$$

Dieser Ansatz führt aber zwangsläufig zu Fehler da hiernach sämtliche Bahnradien zulässig wären was jedoch dem dritten Bohrschen Postulat widerspricht. Wie lässt sich dennoch eine Beschreibung mit Hilfe der Bohrschen Postulate und bekanntem Wissen für das Verhalten im Metallgitter? Zur Vereinfachung nimmt man einen Schnitt aus einem kubischen Kristall, hier wieder das Beispiel metallischer Bindung und strippt das Gitter sodass nur noch die Metallionen übrig bleiben (siehe 1.3). Mann kann sich nun phänomenologisch überlegen, welche Orte für die Elektronen zulässig wären. Je näher der Bahnradius am Mutterkern liegt, desto stärker wirkt die Anziehung des Kerns aufs Elektron. Das heißt in unmittelbarer Nachbarschaft zum Kerns ist die dominante Kraft die Anziehung zum Mutterkern, die Kräfte der anderen benachbarten Kerne werden zwar auch vom Elektron gespürt, sind aber nicht stark genug um es aus dem bohrschen Radius zu reissen. Im Beispiel 1.4 sind die ersten zwei bohrschen Radien entsprechende Radien die ausreichend fest gebunden sind. Dazwischen ergeben sich die klassischen nichtbesetzbaren Radien (in 1.4 weiß dargestellt). Je weiter sich nun der Radius vom Kern entfernt, desto verhältnismäßig stärker wirken die Kräfte der Nachbaratome auf das Elektron. Ab einem gewissen Punkt ist das Elektron so weit vom Mutterkern entfernt, dass die Kraftunterschiede so gering sind, dass es sehr leicht von der Anziehung vom Mutterkern entfernt werden kann. So ergibt sich ein großer, verbundener Bereich besetzbarer Gebiete, der Fermi-See (in 1.4 blau dargestellt).

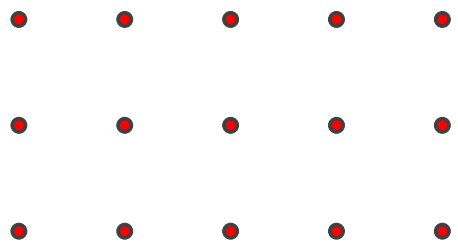


Abbildung 1.3: Metallgitter stripped

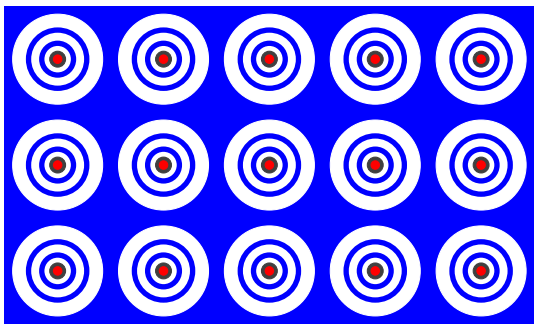
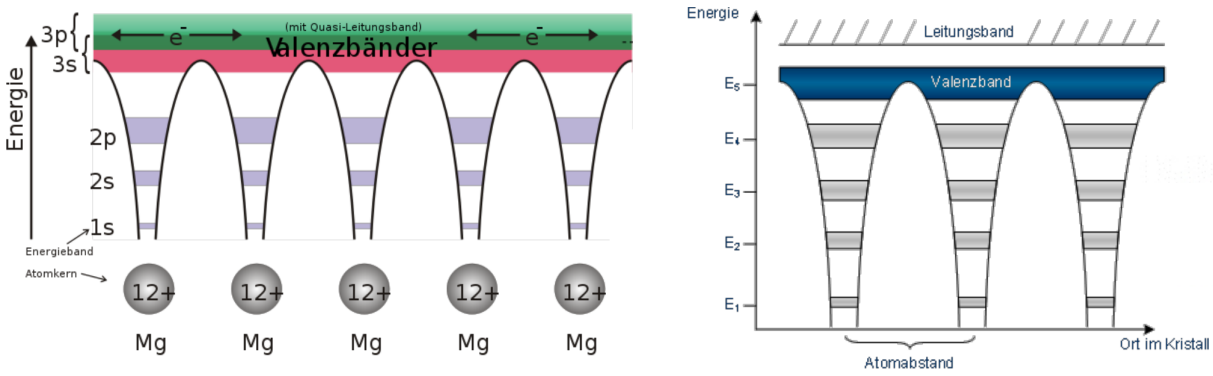


Abbildung 1.4: Metallgitter Bohrsche Radien und Fermi-See

Typischerweise haben nun die quasi freien Elektronen im Fermi-See unterschiedliche kinetische Energien inne. Macht man einen Schnitt duch die Zeichnung und trägt die erlaubte Gesamtenergie des Elektrons im Kristall auf erhält man die Darstellugn in 1.5 (a). Um nun zum Halbleiter zu kommen muss man nur noch eine Bandlücke einführen, denn im Gegensatz zum Metall müssen Elektronen erst Energie zugeführt werden um vom Valenzband ins Leitungsband gehoben zu werden. Dies ist in Abbildung 1.5 (b) dargestellt. Wichtig dabei ist, dass das Valenzband durchgängig sein muss. Das lässt sich logisch damit begründen, da sonst ja keine Löcherleitung stattfinden könnte. Die eingefügte Bandlücke ist dann gerade die mittlere Energie die nötig ist um ein Elektron aus seiner kovalenten Bindung zu befreien.



(a) (b)

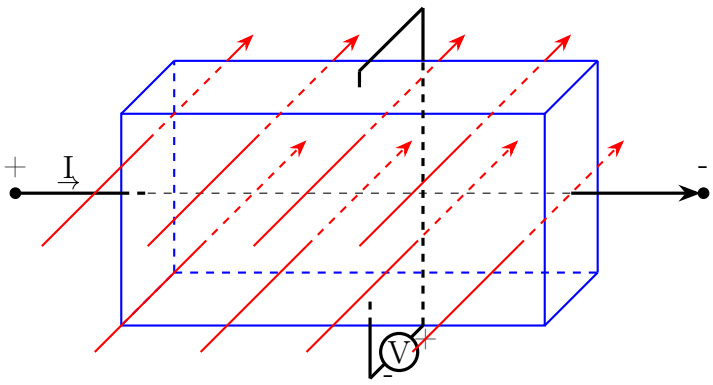
Abbildung 1.5: Besetzbare Zustände in 2D im Metall und Halbleiter (Schulze 2019)

Zur Überprüfung dieses phänomenologisch hergeleiteten Modells liegt es nahe, den Kristall mit EM-Strahlung (hier weißes Licht) zu beschiessen. Mögliche Reaktionen des Kristalls sind Absorption, Transmission und Reflexion.

- In einem Metall stehen naturgemäß sehr viele freie Ladungsträger zur Verfügung, die direkt auf die einstrahlende EM-Welle reagieren. Hierbei werden die Elektronen durch die Welle in Schwingung versetzt, werden dadurch ihrerseits zu einem Hertzschen Dipol und emittieren eigens eine Welle. Damit sind beim Metall die Mechanismen Absorption und Reflexion gegeben. Eine Transmission findet durch die große Anzahl freier Ladungsträger praktisch nicht statt.

- Beim Halbleiter zeigt sich ein anders geartetes Verhalten. Da kaum intrinsische Ladungsträger zur Verfügung stehen die nicht erst ins Leitungsband angehoben werden müssen werden nur hoch energetische Wellen in Form einer Interbandanregung absorbiert. Der Rest transmittiert nahezu ungehindert durch den Kristall. Durch die Natur der Bandlücke ergibt sich eine sehr scharfe Absorptionskante bei einer bestimmten Frequenz.

Da nun die Struktur des Kristalls bekannt und nachgewiesen ist, stellt sich weiter die Frage über die Beweglichkeit der Elektronen/Löcher. Bei der Suche eines experimentellen Nachweises wurde der Hall-Effekt entdeckt. Hierbei wird an eine leitfähige Probe eine Spannung angelegt und ein Stromfluss durch die Probe angeregt. Senkrecht zu der Stromrichtung wird dann ein elektrisches Feld angelegt. Über das Feld werden die Ladungsträger abgelenkt so dass es zu einer einseitigen Ladungsträgerhäufung in der Probe kommt. Diese Ansammlung kann in Form einer Spannung gemessen werden. Daraus lässt sich leicht die Konzentration und Beweglichkeit bestimmen. Über das Vorzeichen der Hall-Spannung lässt sich weiter rausfinden ob es sich um Löcher oder Elektronen handelt.

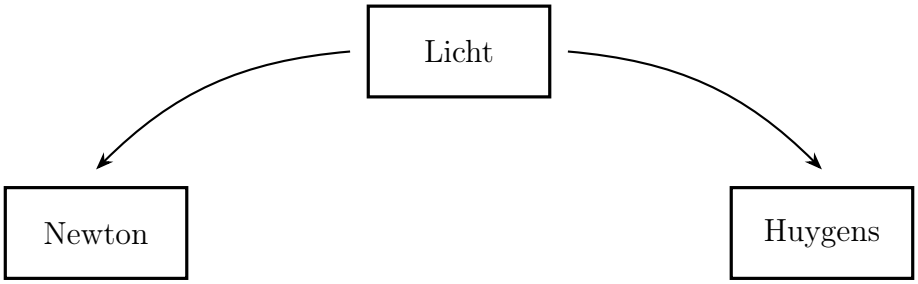


1.5 Licht

1.5.1 Röntgenstrahlung

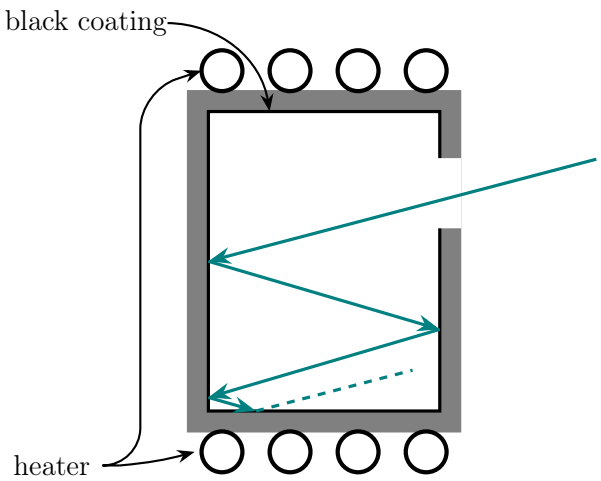
Röntgenstrahlung entsteht, wenn man Elektronen sehr stark durch ein starkes elektrisches Feld ($V \sim 180kV$) beschleunigt in ein Metall schießt. Die Energie muss so stark sein, dass das beschleunigte Elektron in der Lage ist, ein Elektron aus einer inneren Schale eines Atoms zu schiessen. Fällt dann ein Elektron aus dem Fermi-See in die besetzbare Stelle in der Schale sendet es dabei Röntgenstrahlung aus.

1.5.2 Welle-Teilchen Dualismus



Teilchen

- Max Planck untersuchte Hohlraumstrahlung bzw. Schwarzkörperstrahlung. Ein schwarzer Körper ist ein Körper, der das gesamte Spektrum absorbiert und genauso auch emittiert. Diese Art von Körper existiert in der Realität nicht, kann aber durch folgendes Experiment genähert werden:



Dazu benötigt man nur eine geschlossene Box mit einer sehr kleinen Öffnung. Die Innenverkleidung muss komplett schwarz sein. Trifft nun ein Photo auf die Öffnung der Box läuft es sich innerhalb der Box tot, unabhängig von der Energie. Damit simuliert man einen schwarzen Körper. Fügt man noch eine Heizung hinzu so emittiert die Box entsprechend weißes Licht.

Welle

- Wellentheorie bestand zunächst weiter da es für Licht kein Ausbreitungsmedium gibt
- Hertz experimentierte mit Maxwell. Sein Spezialgebiet war das Vakuum, in dem sich aufgrund des fehlen der Ladungsdichte folgende Vereinfachung für die Maxwellschen Gesetze:
  - $\operatorname{div} \vec{D} = 0$
  - $\operatorname{rot} \vec{E} = 0$
- So vereinfacht können die Maxwellgleichungen paarweise zu 2 Gleichungen reduziert werden. Man erhält für $\vec{E}$ und $\vec{B}$ folgende Wellengleichung

$$\Delta \vec{E}(\vec{r}, t) = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E}(\vec{r}, t) \tag{1.5.1}$$

bzw. allgemein:

$$\Delta \vec{x}(\vec{r}, t) = \alpha \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{x}(\vec{r}, t) \tag{1.5.2}$$

in α ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle codiert und es gilt $\alpha = \frac{1}{v^2}$ Setzt man nun ein erhält man für v

$$v_{EMW} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = c_0 \tag{1.5.3}$$

was den Zusammenhang zwischen Licht und der Welle liefert. Als Ansatz zur Lösung dient:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E} \cdot \sin(wt \pm \vec{K} \cdot \vec{r}) \tag{1.5.4}$$

Teilchen

- Das Ergebnis des Experiments war, dass die Hohlraumstrahlung im Rahmen der Maxwellschen Theorie nicht erklärbar ist. Planck stellte fest, dass zur Beschreibung folgende angenommen werden muss, dass das Licht im Hohlraum nur in kleinen Energieportionen der Größe

$$E = h \cdot f \tag{1.5.5}$$

existiert. Misst man die Energie im Hohlraum so erhält man immer ein natürliches Vielfaches dessen. Dies widerspricht Maxwell denn dort müsste gelten

$$E \sim f^2 \sim I \tag{1.5.6}$$

- Weiter fand und beschrieb Einstein den Photoeffekt. Er fand dabei raus, dass Elektronen nur ab einer gewissen Grenzfrequenz emittiert werden. Die kinetische Enerige mit der sich die Elektronen dann weg bewegen ist direkt abhängig von der eingekoppelten Energie. Diese Beobachtung kann man allerdings nur ab einer gewissen Grenzfrequenz machen. Darunter findet absolut keine Reaktion statt, selbst wenn die Intensität beliebig erhöht wird, was wiederum in Widerspruch zur klassischen Maxwellschen Theorie steht. Einstein führt hierbei das Photon ein für das gilt Intensität $\hat{=}$ Anzahl Photonen. Er stellte sich dabei das Photon als ein diskrete Energiepaket vor, das nur ganz an die Probe übergeben werden kann oder gar nicht.

Welle

- Mit dem Wellenvektor $|\vec{K}|$

$$|\vec{K}| = \frac{2\pi}{\lambda} = \sqrt{K_x^2 + K_y^2 + K_z^2}, \quad w = 2\pi f \tag{1.5.7}$$

erhält man dann

$$\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = c_0 = \frac{w}{|\vec{K}|} = \lambda f \tag{1.5.8}$$

zur Überprüfung:

$$v = \frac{s}{t} = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f \quad \checkmark \tag{1.5.9}$$

Teilchen

- Darauf aufbauend beschrieb Louis de Broglie das Photon mit der speziellen Relativitätstheorie und ihrer Energiegleichung

$$E = mc^2 \tag{1.5.10}$$

Eine Aussage der speziellen Relativitätstheorie ist, dass die Masse eines Körpers mit der Geschwindigkeit zu nimmt und gegen ∞ strebt. Daraus folgt direkt dass ein Körper mit träger Masse nie c erreichen kann.

$$m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}} \tag{1.5.11}$$

mit $p = mv$ erhält man

$$E^2 = (pc)^2 + (m_0 c^2)^2 \tag{1.5.12}$$

Betrachtet man nun Licht als ruhemasseloses Teilchen fällt der zweite Summand weg und man erhält

$$E^2_{Photon} = (pc)^2 \tag{1.5.13}$$

Daraus folgt direkt, dass das Photon einen Impuls haben muss. Dies wurde experimentell beim Compton Effekt nachgewiesen. Dazu beschoss Arthur Compton ein Metall, bzw. den Fermi-Sees eines Metalles mit Röntgenstrahlung. Man beobachtet dabei, dass reflektierte Röntgenstrahlung eine geringere Frequenz als beim Abschuss hatte. Demnach wurde Energie verloren, die bei elastischen Stößen mit Elektronen abgegeben wurde. Demnach musste das Röntgen-Photon einen Impuls haben. Damit erhält man

$$E = pc \tag{1.5.14}$$

De Broglie vereinte letztlich die Ergebnisse der unterschiedlichen Experimente und setze sie in Zusammenhang

$$E = h \cdot f = p \cdot c,\ c = h \cdot f \Rightarrow p = \frac{hf}{\lambda} = \frac{h}{\lambda} \tag{1.5.15}$$

De Broglie vermutete dann weiterhin, dass diese Dualität auch für Elektronen postuliert

werden könnte. Parallel zu de Broglie arbeitete Bohr an seinem Atommodell, dessen drittes Postulat bekannterweiße

$$mvr = n\frac{h}{2\pi} = n\hbar \tag{1.5.16}$$

ist. Mit $p = mv$ und de Broglies Theorie erhält man weiter

$$pr = n\hbar \qquad , \; n = 1, 2, 3, ... \tag{1.5.17}$$

$$2\pi r = n\frac{h}{p} = n\lambda \tag{1.5.18}$$

$2\pi r$ ist nun der Umfang einer bohrschen Bahn die nach der Erkenntnis ein ganzzahliges Vielfaches von λ sein muss. Diese Nebenbedingung tritt immer bei stehenden Wellen auf
$\rightarrow$ Es sind nur die Radien erlaubt, auf denen das Elektron eine stehende Welle einnimmt. mit (1.5.2) und (1.5.2) erhält man den relativistischen Energiesatz für ruhemasselose Teilchen.

$$c = \lambda f \underset{E=h\cdot f}{\overset{p=\frac{h}{f}}{\rightarrow}} E = p \cdot c \tag{1.5.19}$$

Aufbauend auf den vorhergehenden Arbeiten suchte Erwin Schrödinger zunächst nach einer Wellengleichung für das Elektron. Die Wellengleichung des Lichts (1.5.2) ist bekannt und wird mit (1.5.2) gelöst. Diese Lösung ist allerdings nur dann Lösung, wenn die Parameter der Lösung ω und $\vec{K}$ mit den Parametern der Differentialgleichung ε_0 und μ_0 über den relativistischen Energiesatz (1.5.2) verknüpft ist. Mathematisch ausgedrückt bedeutet das, nur wenn die Dispersionsrelation (die Nebenbedingung) gilt, ist (1.5.2) eine Lösung der Differentialgleichung. Physikalisch interpretiert bedeutet das, dass die obere Gleichung ein Phänomen beschreibt, dass in Raum und Zeit durch die Dispersionsrelation beschrieben wird, für die der relativistische Energiesatz für ruhemasselose Teilchen gilt. Das einzig bekannte Objekt das sich so verhält ist Licht mit der Lösung in (1.5.2). Erwin Schrödinger versuchte die bekannten Ergebnisse dann aufs Elektron zu übertragen.

Elektron

<u>Teilchen</u>

$$\begin{aligned} E &= E_{kin} + E_{pot} \\ &= \frac{1}{2}mv^2 + E_{pot} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow h \cdot f &= \frac{1}{2}\frac{p^2}{m} + E_{pot} \\ &= \frac{1}{2}\frac{h^2}{\lambda^2 m} + E_{pot} \\ \omega = 2\pi f \ |\vec{K}| &= \frac{2\pi}{\lambda} \ \hbar = \frac{h}{2\pi} \\ \hbar\omega &= \frac{1}{2}\frac{\hbar^2|\vec{K}^2|}{m} + E_{pot} \end{aligned}$$

So erhält man den nicht relativistischen Energiesatz für massebehaftete Teilchen, also die Dispersionsrelation die eine Wellengleichung und deren Lösung verknüpft.

<u>Verknüpfung von Welle und Teilchen</u>

$$E = h \cdot f$$

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

<u>Welle</u>

Da weder die Wellengleichung noch die Lösung bekannt ist setzt man den einfachsten Fall, eine ebene Welle ein. Damit ergibt sich die Lösung

$$\psi(\vec{r}, t) = \psi_0 e^{i(wt \pm \vec{K}\vec{r})} \tag{1.5.20}$$

Man kann sich nun die DGL aus der Lösung rekonstruieren. Wir benötigen 3 Terme, einen für eine einfache zeitliche Ableitung für ω, eine zweifache Ableitung nach dem Ort für $\vec{K}$ und einen weiteren für E_{pot} aus der Dispersionsrelation. So ergibt sich:

$$A \cdot \underbrace{\Delta\psi(\vec{r}, t)}_{\to K^2} + B \cdot \underbrace{\frac{\partial\psi(\vec{r}, t}{\partial t}}_{\to\omega} + C \cdot \underbrace{\vec{\psi}}_{E_{pot}} = 0 \tag{1.5.21}$$

To-Do: 2 fache räumliche, einfache zeitliche Ableitung bilden und Koeffizienten bestimmen.

Kapitel 2

Anhänge

2.1 Geschichtliche Facts

- Kommerzieller Start: 1948 (Bell-Labs)
  - Zunächst mit Germanium aufgrund besserer Eigenschaften
  - Erstamls BPT (Bipolartransistor) genutzt für Verstärker- und HF-Technik. Der BPT sticht hier mit einer höheren Löcher- und Elektronenbeweglichkeit hervor. Insbesondere für eine hohe Löcherbeweglichkeit ist Germanium das beste bekannte Material.
- Si dominiert den Markt seit 1965
- Übergang von $> 100nm$ zu $< 100nm$ ungefähr im Jahr ~ 2000
- Der erste Transistor wurde 1938 von Robert Wichard Pohl und Rudolf Hilsch aus Kalium-Bromid hergestellt. Das Material war aber ungeeignet da wasserlöslich.
- Erstes kommerzielles transistorbasiertes Produkt: Texas Instruments Taschenrechner

2.2 Abkürzungen/Bezeichnungen

- CVD : C hemical Vapor Deposition
- sputter : zerstäuben (engl.)
- epi : Epitaxie = gerichtetes Aufwachsen (gr.)
- Flache Störstelle: Störstelle nahe der Leitungs/Valenzbandkante
- Tiefe Störtstelle: Störstelle die tief in der Bandlücke liegt
- BJT: Bipolar Junction Transistor
- Transistor: Transfer Resistor
- SRAM: Static Random Access Memory
- DRAM: Dynamic Random Access Memory
- Iso: gleich
- Trop: Raum

- Isotrop leitend: Im Raum in alle Richtungen gleich gut leitend
- Anisotrop leitend: Im Raum in unterschiedlichen Richtungen unterschiedlich gut leitend
- Morphologie: Struktur (Form)
- Homo: Gleich im Sinne von ähnlich
- Iso: Gleich im Sinne von identisch
- Homomorphismus: Ähnlich in der Struktur
- Isomorphismus: Identisch in der Struktur
- pe: plasma enhanced
- Inertgas: Gase die sehr reaktionsträge sind z.B. Edelgase oder Stickstoff

2.3 Nice to know

- Der BPT ist sehr viel schneller als der MOSFET und wird daher häufig noch in der HF Technik eingesetzt.
- MOSFETs können als normally on oder normally off gebaut werden. Am gebräuchlichsten ist normally off.
- Ein Areniusplot stellt die Temperatur und die Leitfähigkeit ins Verhältnis.
- Eine Elektronenpaarbindung ist eine kovalente Bindung PNP Transistoren sind üblicherweise breiter als NPN Transistoren, da die Beweglichkeit von Löchern kleiner als die von Elektronen ist $\rightarrow$ bei gleicher Baugröße treibt ein PNP Transistor weniger Strom als ein NPN Transistor
- Im Periodensystem abwärts werden die Atome immer größer
- Zinn hat bis $13°C$ die gleiche Kristallstruktur wie Silizium, danach baut es sich zu sogenanntem Beta-Zinn um, das dieselbe Struktur wie Metall hat.
- Bei Isotopen sind die Anzahl der Protonen gleich der Anzahl der Neutronen gleich der Anzahl der Elektronen. Sie sind damit die Grundzustände von Atomen
- Größenordnung zwischen Atomen: Angström
- Größenordnung im Atomkern: $10^{-15}m$
- Systemarten

Systemart	Anzahl Teilchen
Mikroskopisch	Maximal 3 Teilchen
Mesoskopisch	$\sim$ 100 - 1000 Teilchen
Makroskopisch	$\sim$ Millionen und mehr Teilchen

  Bei Makroskopischen Systemen wird statistisch gearbeitet. D.h. es wird der Mittelwert des Systems untersucht um so das Problem auf ein Ein-Teilchen Problem zu reduzieren.

- Die Intensität einer Welle hängt vom Quadrat der Amplitude ab

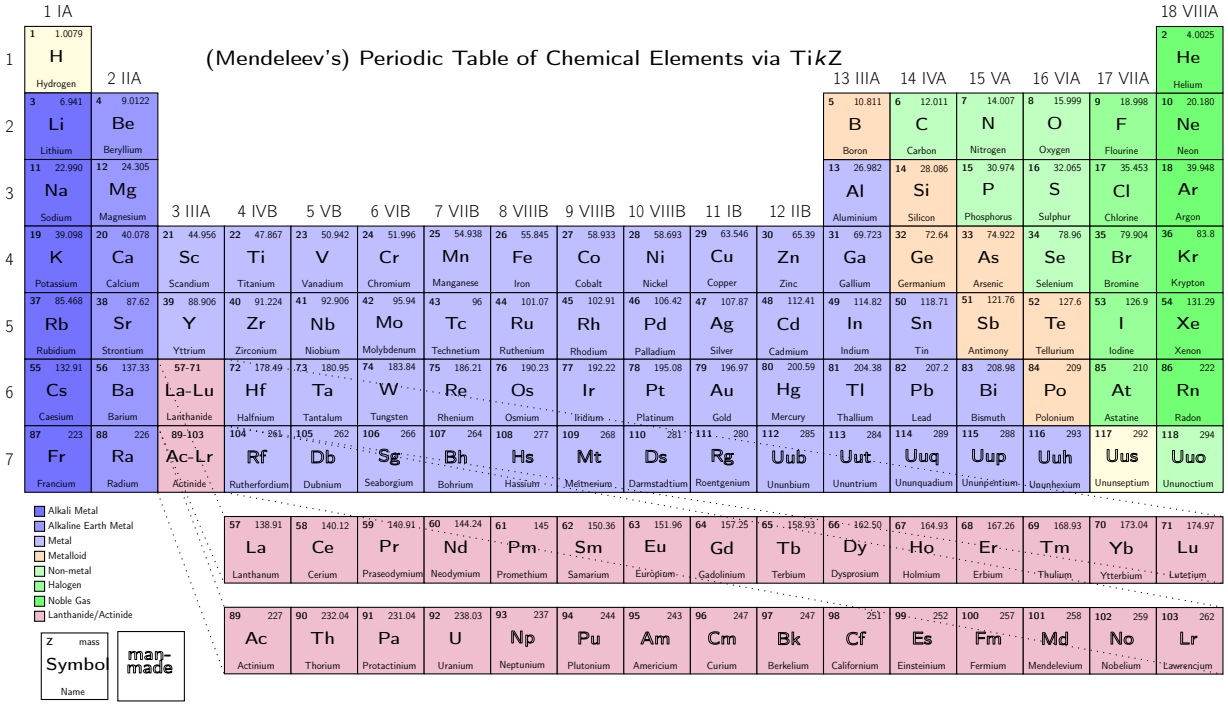
- Die Energie einer EM-Welle hängt von der Frequenz und Intensität ab
- Grenzfrequenz lässt sich mit klassischer Physik nicht richtig erklären
- Einstein hat bei der Untersuchung des photoelektrioschen Effekts den Begriff des Photons geprägt
- Mehr Intensität $\Rightarrow$ mehr Photonen $\Rightarrow$ Photon $\cong h \cdot f \Rightarrow$ abhängig von der Frequenz
- Pauliprinzip: Jeder Zustand (auch einzelne Spins) ist entweder frei oder durch nur ein Elektron besetzbar
- Elemente gehen nur solche chemische Verbindungen ein, dass sie möglichst in Edelgaskonfiguration kommen, also abgeschlossene Außenschalen haben
- Im Periodensystem stehen Metalle meistens in sogenannten Übergangsgruppen bzw. Nebengruppen. Hier ist es schwierig zu sagen ob ein Element Elektronen aufnehmen oder abnehmen sollte um Edelgaskonfiguration zu erreichen
- In Materie befinden sich ca. $10^{23} cm^{-3}$ Atome, gibt nun jedes dieser Atome 1-2 Elektronen in den Fermi-See abgibt erhalten wir ca. $1 - 2 \cdot 10^{23} cm^{-3}$ Elektronen $\Rightarrow$ sehr hohe Leitfähigkeit
- Zu 99% besteht Materie aus nichts
- Komplette Bandstruktur wäre ein 7D Bild
- Metalle werden nach Dichte klassifiziert (Leicht- und Schwermetall)
- In einem Metall ist der letzte bei $T = 0K$ noch besetzte energetische Zustand das Fermi-Niveau
- Die Elektronen die bei einem Metall hauptsächlich für die Leitfähigkeit eine Rolle spielen sind die Nahe des Fermi-Niveaus, da dort die Hauptmasse der Elektronen ist
- Natrium und Chlor diffundiert gerne in Glas
- Struktur der Größe $x\ nm$ muss mit Licht der Wellenlänge $\lambda \approx x\ nm$ bestrahlt werden zur mikroskopischen Untersuchung/Lithographie
- Mensch sieh grün und gelb am besten $\sim 600nm$
- $1cm^3$ Si besteht aus $\sim 10^{23}$ Atomen
- Minimale Reinheit die Si für die Produktion von Halbleitern vorweisen muss: 0.999999999, wobei die Genauigkeit auf mind. 8 Nachkommastellen gegeben sein muss.

2.4 Literaturempfehlungen

- Sze - Physics of Semiconductor Devices & Semiconductor Devices – Physics and Technology, John Wiley

- Hoffmann - Systemintegration, Oldenburg

2.5 Periodensystem



2.6 Nachwort

Dieses Dokument versteht sich einzig als Zusammenfassung des NT2 Stoffes auf Basis der Literatur und der Vorlesungsunterlagen aus der NT2 Vorlesung von Prof. Dr.-Ing Stephan ten Brink. Der Sinn ist einzig mir selbst und meinen Kommilitonen das studieren der Nachrichtentechnik zu erleichtern. In diesem Sinne erhebe ich keinerlei Anspruch auf das hier dargestellte Wissen, da es sich in großen Teilen nur um Neuformulierungen aus der Literatur, den Vorlesungen und aus der Begleitübung. Sollten sich einige Fehler eingeschlichen haben (was sehr wahrscheinlich ist) würde ich mich freuen, wenn man mich per Email (f.leuze@outlook.de) kontaktieren und mir entsprechende Fehler mitteilen würde.

Kapitel 3

Literaturverzeichnis

Schulze, P. D. H. J. (2019), ‘Hl1 script’. Vorlesungsscript.